

## ESTUDO DOS EFEITOS DA INTERAÇÃO DA LUZ COM A MATÉRIA

Angelo Thiago de Souza Catanio (PIBIC/CNPq/FA/UEM), Nelson Guilherme Castelli Astrath (Orientador), e-mail: angelocatanio@hotmail.com

Universidade Estadual de Maringá / Centro de Ciências Exatas e da Terra/  
Maringá, PR.

### Ciências Exatas e da Terra: Física

**Palavras-chave:** fenômenos fototérmicos, difusão de calor, termoelasticidade.

### Resumo:

Neste projeto foi estudado a solução da equação de difusão de calor e a solução da equação termoelástica de uma amostra semi-infinita induzidas pela a interação de um feixe laser com a matéria. O interesse deste tipo de problema está diretamente relacionado com técnicas de caracterização de materiais as quais utilizam a detecção dos efeitos fototérmicos. Para a maioria dos materiais a absorção óptica segue a Lei de Beer, caracterizada pelo coeficiente de absorção óptica. Nos limites para altos e baixos valores de absorção óptica - denominado modelo de alta absorção e modelo de baixa absorção, respectivamente, soluções simplificadas podem ser obtidas para ambas as equações. Quando o feixe de excitação incide no material, o mesmo provoca no material um gradiente de temperatura, que conseqüentemente, pode ocasionar uma expansão ou uma contração da superfície do material da ordem dos nanômetros. Como as soluções das equações envolvem um cálculo matemático muito rigoroso, foi usado o software *Wolfram Mathematica* (Licença L3206-5660), no qual foi possível resolver as equações diferenciais relacionadas ao efeito fototérmico.

### Introdução

A interação entre radiação eletromagnética e a matéria pode induzir diversos processos, como por exemplo, absorção, reflexão, espalhamento e até mesmo foto-reação. Quando a radiação é absorvida e parte da energia eletromagnética for convertida em calor, esse fenômeno é conhecido como fenômeno fototérmico. O estudo dos fenômenos fototérmicos se desenvolveu com mais intensidade a partir da década de 60 com o desenvolvimento do laser.

O aquecimento fototérmico produz alguns efeitos característicos como a deformação da superfície, variação do índice de refração da amostra, ondas

térmicas, gradiente de temperatura, entre outros. O processo de geração e difusão do calor em um material é descrito pela equação de difusão

$$\frac{\partial T(r, z, t)}{\partial t} - \frac{k}{c \rho} \nabla^2 T(r, z, t) = Q(r, z, t), \quad (1)$$

sendo  $k$  é a condutividade térmica,  $c$  é o calor específico,  $\rho$  é a densidade de massa,  $Q(r, z, t)$  é o termo de fonte. Neste trabalho vamos resolver a equação de difusão utilizando o método de transformas integrais (Hankel-Fourier-Laplace).

A absorção de energia e conseqüente aquecimento do material induzem outros efeitos, como por exemplo expansão ou contração, a qual é descrita pela equação termoelástica [1,2]

$$(1 - 2\theta)\nabla^2 u(r, z, t) + \nabla(\nabla u(r, z, t)) = 2(1 + \theta)\alpha_T \nabla T(r, z, t). \quad (2)$$

Na relação acima  $u$  é a deformação,  $\alpha_T$  é o coeficiente de expansão térmica e  $\theta$  é a razão de Poisson.

## Materiais e métodos

As soluções da equação de difusão e da equação termoelástica são obtidas pelo uso do método de transformadas integrais, as quais são efetuadas com o auxílio do software Mathematica. Este software permite cálculos algébricos de uma forma simples de modo que as soluções obtidas podem ser analisadas e comparadas com os resultados numéricos.

## Resultados e Discussão

A solução da equação de difusão nos fornece o perfil de temperatura para materiais que satisfazem a lei de Beer-Lambert (BLM) para a absorção óptica, dada pela relação

$$T(r, z, t) = \frac{2 P_s A_s}{\rho c \pi \omega_{0s}^2} \int_0^t \left\{ \frac{1}{2} \exp \left[ \frac{1}{4} A_s \left( -4z + \frac{A_s \tau \omega_{0s}^2}{t_c} \right) \right] \operatorname{Erfc} \left[ \frac{A_s \tau \omega_{0s}^2 - 2z t_c}{2 \omega_{0s} \sqrt{\tau t_c}} \right] + \exp[2z A_s] \operatorname{Erfc} \left[ \frac{A_s \tau \omega_{0s}^2 + 2z t_c}{2 \omega_{0s} \sqrt{\tau t_c}} \right] \right\} \frac{\exp \left[ -\frac{2r^2}{\omega_{0s}^2} / \left( 1 + \frac{2\tau}{t_c} \right) \right]}{1 + \frac{2\tau}{t_c}} d\tau \quad (3)$$

A solução acima pode ser simplificada no caso de materiais com baixo coeficiente de absorção óptica (LAM – Low Absorption Model),

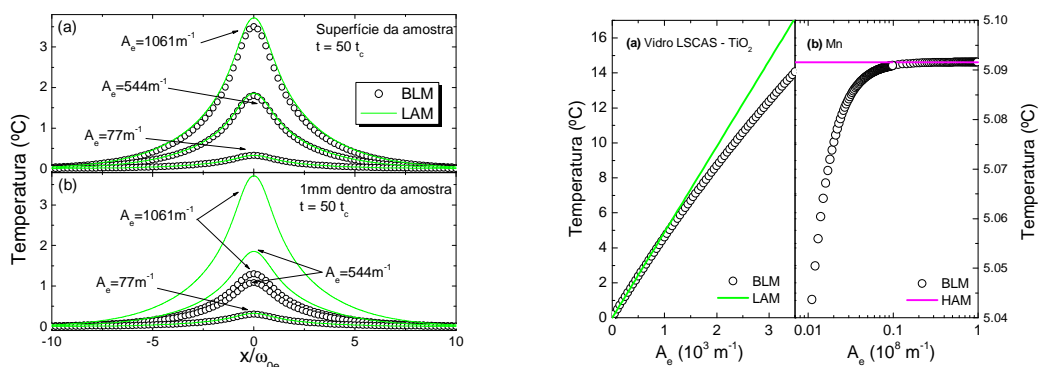
$$T_{LAM}(r, t) = \frac{2 P_s A_s}{\rho c \pi \omega_{0s}^2} \int_0^t \frac{\exp \left[ \frac{-2r^2 t_c}{(t_c + 2\tau) \omega_{0s}^2} \right]}{t_c + 2\tau} t_c d\tau. \quad (4)$$

Igualmente, para o caso de materiais opacos, ou seja, com alto coeficiente de absorção óptica (HAM – High Absorption Model), temos

$$T_{HAM}(r, z, t) = \frac{4 P_s}{\rho C \pi \omega_{0s}^2} \int_0^t \frac{\exp\left[\frac{-z^2 t_c}{\tau \omega_{0s}^2}\right] \exp\left[-\frac{2r^2}{\omega_{0s}^2} \left(1 + \frac{2\tau}{t_c}\right)\right]}{\sqrt{\pi} \sqrt{\frac{\tau \omega_{0s}^2}{t_c}} \left(1 + \frac{2\tau}{t_c}\right)} d\tau. \quad (5)$$

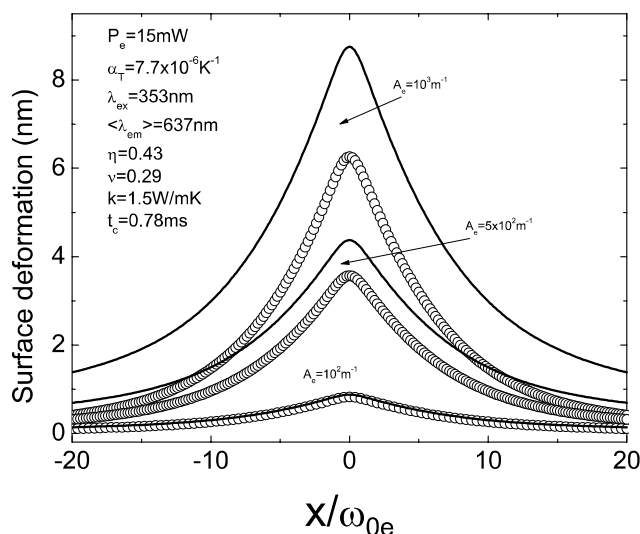
De uma forma equivalente podemos também obter as equações que descrevem o perfil de deformação resultante do aquecimento localizado descrito acima. Ambas as soluções tem fundamental importância na formulação das técnicas de Lente Térmica e Espelho Térmico, técnicas muito utilizadas na caracterização de propriedades térmicas, ópticas e mecânicas de materiais sólidos e líquidos.

Abaixo segue figuras mostrando como o modelo LAM descreve de forma satisfatória o perfil de temperatura para o caso de baixos coeficiente de absorção óptica e de forma equivalente o modelo HAM para o caso de altos valores do coeficiente de absorção óptica.



**Figura 1** – Comparação entre LAM, HAM e BLM para diferentes coeficientes de absorção óptica.

Na figura 2 mostramos o perfil de deformação induzido pela variação de temperatura para valores característicos de amostras de baixa absorção óptica. Da mesma forma observamos a convergência do modelo LAM para valores de absorção óptica pequenos.



**Figura 2** – Deformação do material a utilizando o modelo BLM (linha contínua) e LAM (símbolos).

## Conclusões

O método de transformadas integrais é uma ferramenta muito útil para obtermos soluções de equações diferenciais. Neste trabalho obtemos a solução da equação de difusão e equação termoelástica assumindo diferentes limites para o coeficiente de absorção óptica. Estas soluções são de fundamental importância para as técnicas de caracterização de propriedades de materiais baseadas nos efeitos fototérmicos.

## Agradecimentos

Agradeço às agências Capes, Fundação Araucária e CNPq pelo apoio financeiro.

## Referências

- [1] SATO, F. Desenvolvimento da Técnica de Espelho Térmico, 2009. Tese (Doutorado em Física) Programa de Pós-Graduação em Física, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2009.
- [2] BELANÇON, M. P. Análise das Técnicas de Espelho Térmico e de Lente Térmica Para o Estudo de Materiais Semitransparentes e Opacos, 2009. Dissertação (Mestrado em Física) Programa de Pós-Graduação em Física, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2009.
- [3] BUTKOV, E. Física Matemática, ed.1, Rio de Janeiro: Guanabara Dois S.A., p.301 1978.